

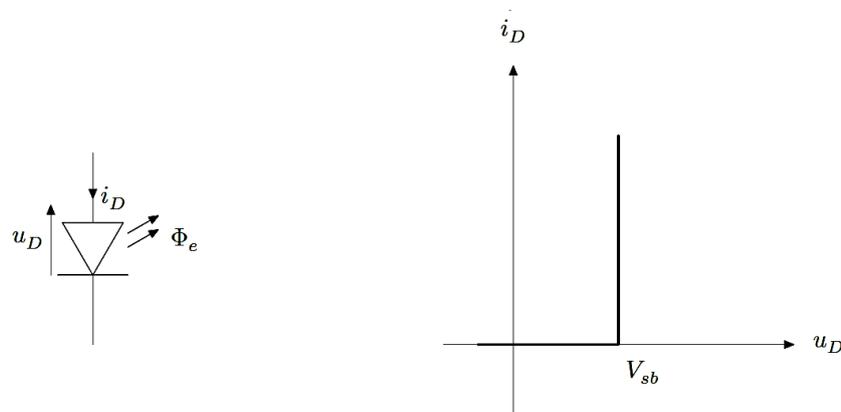
## DM 1 de Physique à rendre le vendredi 13/09/24

## Connexion à Internet par LiFi

Parmi les nombreux avantages du transport ferroviaire, on peut citer la possibilité d'utiliser le temps du transport comme un temps de travail ou de loisir grâce, notamment, à une connexion Internet individualisée. Dans cette partie est étudiée la technologie LiFi (Light Fidelity), ainsi nommée par analogie avec le WiFi (Wireless Fidelity), une solution innovante pour les connexions Internet individualisées dans des espaces restreints tels que la cabine d'un avion ou un wagon de train. Le LiFi exploite la lumière visible pour transmettre l'information. Son apparition coïncide avec le développement de l'éclairage par les diodes électroluminescentes.

## Document

Comme pour les diodes « simples », les diodes électroluminescentes mettent en jeu une jonction entre deux matériaux semi-conducteurs (jonction PN). Les photons sont émis lorsque le courant direct qui traverse la jonction provoque la recombinaison d'une paire électron-trou. La caractéristique d'une diode électroluminescente varie selon la couleur émise. Dans le cas d'une diode émettrice de lumière bleue, la caractéristique courant-tension a l'allure suivante :



Pour  $i_D > 0$ , la diode considérée émet une lumière bleue de longueur d'onde dans le vide  $\lambda_b = 470 \text{ nm}$  ; la tension à ses bornes est alors égale à  $V_{sb} = 2,90 \text{ V}$ . Le rendement en puissance de la diode électroluminescente, défini comme le rapport de la puissance lumineuse  $\Phi_e$  émise sur la puissance électrique reçue, est égal à  $\eta_{\text{led}} = 33 \%$ . En première approximation, on peut considérer que la puissance lumineuse  $\Phi_e$  est rayonnée de façon isotrope dans le demi-espace qui se situe au-dessus du composant.

Dans ce problème, nous ne considérerons que le flux de données descendant vers l'utilisateur. Le schéma de la figure 8 représente le principe de la transmission d'une information par la lumière. La tension  $u_e$  contient le signal informatif. Elle alimente la diode électroluminescente  $D_1$  émettrice de lumière bleue, de sorte que l'amplitude de l'onde lumineuse émise soit modulée par le signal  $u_e$ . La diode  $D_2$ , polarisée en sens indirect grâce au potentiel  $V_0$  qui est positif, est photoréceptrice. L'intensité  $i_2$  du courant qui parcourt  $D_2$  est proportionnelle au flux lumineux qu'elle reçoit, de sorte que la tension  $u_r$  contient l'information utile.

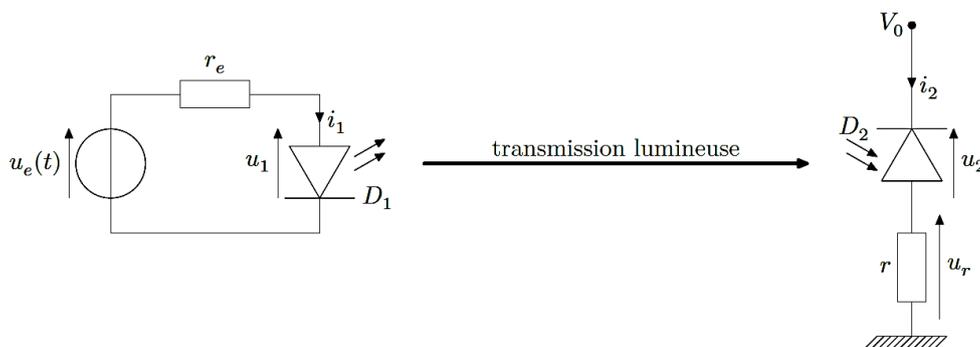


Figure 8 Principe de la transmission d'information par la lumière.

## A – Émission du signal lumineux

Dans le circuit émetteur, la résistance  $r_e = 10 \Omega$  a pour fonction de commander le passage du courant dans la diode par la tension  $u_e$ , en même temps qu'elle la protège. La diode émet de la lumière lorsque l'intensité du courant  $i_1$  qui la traverse en sens direct est positif ; on notera la puissance lumineuse moyenne émise  $\Phi_e$ . Dans le modèle adopté, la puissance moyenne émise est proportionnelle au courant  $i_1$  avec un coefficient de proportionnalité  $K_e$ , soit  $\Phi_e = K_e i_1$ .

**Q 32.** Déterminer la valeur constante minimale  $U_{\min}$  de  $u_e$  qui permet d'obtenir une émission lumineuse par la diode.

**Q 33.** Calculer la valeur constante  $U_0$  de  $u_e$  qui permet d'obtenir un courant  $i_1$  constant égal à  $i_0 = 0,73 \text{ A}$  à travers la diode. Calculer la puissance lumineuse moyenne correspondante, notée  $\Phi_{e0}$ , émise par la diode.

Pour transmettre une information par la lumière, la technologie LiFi utilise le principe de la modulation d'amplitude. Le signal porteur correspond au signal lumineux de longueur d'onde  $\lambda_b$  émis par la diode, dont on module l'amplitude à l'aide d'un signal sous-porteur  $p(t)$ . Par la suite, on considère que le signal sous-porteur est sinusoïdal, d'amplitude  $p_m$ , de fréquence  $f_p = \omega_p/2\pi$  et de phase à l'origine  $\alpha_p$  :  $p(t) = p_m \cos(\omega_p t + \alpha_p)$ .

On note  $a(t)$  la tension correspondant au signal contenant l'information ; les fréquences contenues dans le spectre de  $a(t)$ , notées  $f_a$  sont très inférieures à la fréquence  $f_p$ . On génère la tension  $u_e(t)$  du circuit émetteur grâce au circuit de la figure 9, qui contient un bloc multiplieur  $M_1$  et un bloc additionneur  $A_1$ . Le bloc multiplieur  $M_1$  réalise le produit des deux tensions d'entrée, soit dans le cas du circuit considéré  $m_1(t) = k_m \times p(t) \times a(t)$ , avec  $k > 0$ . Les impédances d'entrée des blocs  $A_1$  et  $M_1$  sont infinies.

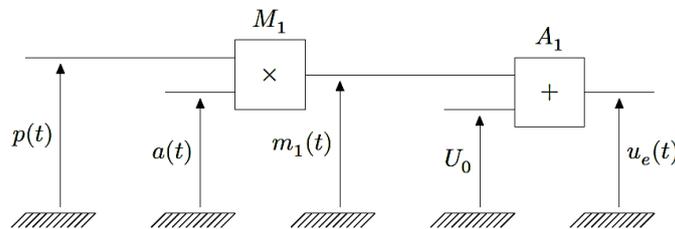


Figure 9 Schéma du circuit de réalisation de  $u_e(t)$

**Q 34.** Exprimer la tension  $u_e(t)$  dans le cas où  $a(t)$  est un signal sinusoïdal d'amplitude  $a_m$ , de fréquence  $f_a = \omega_a/2\pi$  telle que  $f_a \ll f_p$ . Quelle est la valeur maximale du produit  $k \times p_m \times a_m$  qui permet de s'assurer que la diode électroluminescente émet toujours de la lumière ?

**Q 35.** Représenter l'allure du signal  $u_e(t)$ , ainsi que l'allure de son spectre, dans le cas où le signal  $a(t)$  est sinusoïdal de fréquence  $f_a = f_p/10$ .

**Q 36.** Représenter l'allure du signal  $u_e(t)$ , ainsi que l'allure de son spectre, dans le cas où le signal  $a(t)$  est un signal créneau variant entre 0 et  $a_m$ , de fréquence  $f_a = f_p/10$ . L'allure d'un spectre d'un tel signal créneau est donné en annexe.

## B – Réception du signal lumineux et extraction de l'information

La photodiode réceptrice est située à la distance  $d$  de la diode émettrice et capte le flux lumineux  $\Phi_r$  qui arrive sur sa surface, d'aire  $s_r$ . Lorsqu'elle est polarisée en inverse comme sur le schéma de la figure 8, le courant  $i_2$  qui la traverse en sens indirect est proportionnel au flux  $\Phi_r$  et on note  $i_2 = K_r \Phi_r$ , où  $K_r$  est une constante positive.

**Q 37.** Exprimer la tension  $u_r(t)$  en fonction de  $u_e(t)$ ,  $V_{sb}$ ,  $d$ ,  $r$ ,  $r_e$ ,  $s_r$ ,  $K_e$  et  $K_r$ .

Pour extraire le signal informatif du signal  $u_r$ , on réalise le montage de la figure 10 dans lequel  $A_2$  est un amplificateur de tension, tel que  $u_{r1} = K u_r$ , et  $M_2$  est un multiplieur identique à  $M_1$ . Dans le montage figure également le bloc  $F$  constitué d'une résistance  $r_2$  et d'un condensateur de capacité  $C_2$ .

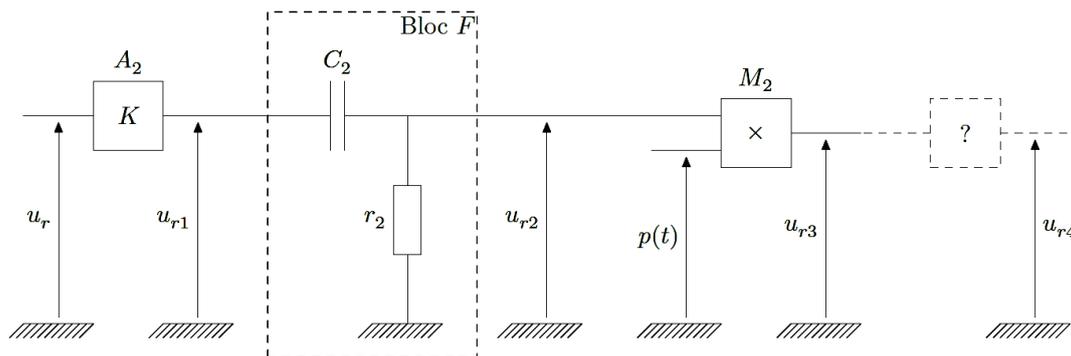


Figure 10 Schéma du circuit d'extraction de l'information à partir de la tension  $u_r(t)$ .

**Q 38.** Quelle est la fonction du bloc  $F$ ? Exprimer sa fonction de transfert et préciser sa pulsation de coupure  $\omega_c$  en fonction de  $r_2$  et  $C_2$ .

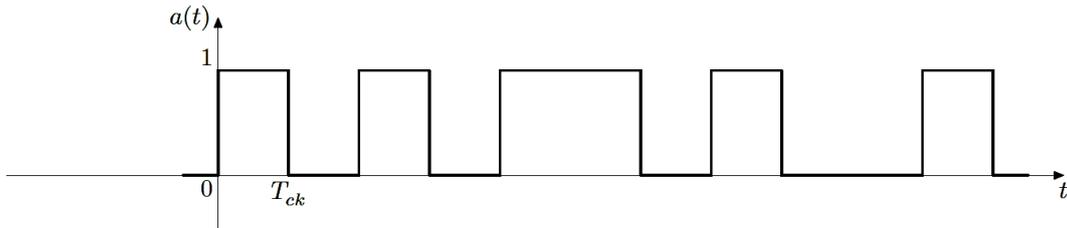
On considère un signal informatif de la forme  $a(t) = a_m \cos(\omega_a t)$ , tel que  $\omega_c \ll \omega_a \ll \omega_p$ .

**Q 39.** Montrer que la tension  $u_{r3}$  peut s'écrire sous la forme  $u_{r3} = U_{3m} \cos^2(\omega_p t + \alpha_p) \cos(\omega_a t)$ ; exprimer l'amplitude  $U_{3m}$  en fonction des données du problème, puis représenter le spectre du signal  $u_{r3}$ .

**Q 40.** On souhaite que la tension  $u_{r4}$  soit proportionnelle au signal informatif. Proposer un montage pour le bloc inconnu, noté « ? » sur la figure 10.

## C – Débit binaire du LiFi

En pratique, le signal informatif est un signal binaire, dont l'allure qualitative est présentée figure 11 où  $T_{ck}$  est la période d'horloge. Pour que la modulation décrite dans la sous-partie A soit correcte, il faut s'assurer que la fréquence d'horloge  $f_{ck}$  vérifie la condition  $f_{ck} < f_p/100$ .



**Figure 11** Allure d'un signal informatif pour une transmission binaire

**Q 41.** Les liaisons WiFi actuelles procurent un débit descendant de l'ordre de  $10 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ , obtenu avec des porteuses dont la fréquence est de l'ordre de quelques GHz. Vérifier que la condition d'une bonne modulation est satisfaite.

On considère désormais le cas d'une installation LiFi utilisant des diodes électroluminescentes émettant une lumière bleue de longueur d'onde  $\lambda_b = 470 \text{ nm}$  dans le vide.

**Q 42.** Calculer la fréquence de la porteuse lumineuse. En déduire l'ordre de grandeur de la fréquence de la sous-porteuse qui peut être utilisée pour la technologie LiFi, puis estimer l'ordre de grandeur du débit binaire maximal que l'on peut obtenir avec le LiFi. Commenter.

*Rem : le signal informatif serait donc appelé sous-porteuse.*

## Données :

Vitesse de propagation de la lumière dans le vide  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Spectre en amplitude d'un signal créneau de fréquence  $f$  (premières harmoniques)

